

# WinModFet: Herramienta software para la extracción del circuito equivalente de pequeña señal para transistores FET de microondas.

Jose María Zamanillo, Daniel González, Ángel Mediavilla,  
[jose.zamanillo@unican.es](mailto:jose.zamanillo@unican.es), [daniel.gonzalezp@alumnos.unican.es](mailto:daniel.gonzalezp@alumnos.unican.es), [angel.mediavilla@unican.es](mailto:angel.mediavilla@unican.es)

Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria .

Avda. Los Castros s/n., 39005 Santander, España.

**Abstract-** This paper is the result of our research on the small-signal behavior of a GaAs device, in the overall I-V plane. A complete small-signal model for a MESFET is determined from experimental scattering parameter measurements. All algorithms for mathematical extraction of the microwave equivalent circuit are implemented in an application called WinModFet developed for research and educational purposes. The software has been made under friendly user philosophy and is self-explicative. The able to save and recall standard ASCII measured data files, coupled with the graphical and mathematical capacities of MATLAB makes this software an interesting tool easy to use by users at any level. A modification of traditional methods is also presented here, by means of a weighted grid function using the values of scattering files that surrounds the working bias point.

## I. INTRODUCCIÓN

La extracción de los elementos, tanto intrínsecos como extrínsecos, es de vital importancia en el proceso de diseño de circuitos microondas para la caracterización del modelo de pequeña señal de un transistor. Tradicionalmente se ha utilizado en el cálculo de los distintos elementos del circuito de pequeña señal la aproximación de Dambrine [1], o una pequeña variación de la misma, la de Berroth y Bosch [2]. Ambos métodos, una vez calculados los elementos extrínsecos a partir de mediadas con el FET frío ( $V_{ds}=0$ ) estos son eliminados de la matriz de scattering mediante diversas operaciones, obteniendo así la matriz de scattering intrínseca del dispositivo a caracterizar. Una vez obtenida esta matriz existen diversos métodos para la extracción de los elementos intrínsecos, como el del propio Dambrine en [1], Berroth y Bosch en [2], ó M. Golio [3] todos ellos proponen ecuaciones distintas para el cálculo de los elementos intrínsecos del modelo clásico de Vendelin-Dambrine, poseyendo todas ellas limitaciones en frecuencia, debido a las aproximaciones realizadas, dichas limitaciones ya fueron evitadas mediante una formulación exacta en [4]. Dichos algoritmos, así como alguno más de los existentes para la extracción extrínseca como los de Tayrani [5], Wolff [6] ó White [7], fueron implementados en un programa informático desarrollado en lenguaje Basic estructurado para computadoras de la serie 300 de Hewlett Packard cuyos resultados y funcionamiento fueron anteriormente comunicados [4]. Pero, dada a la no transportabilidad del software a ordenadores tipo PC y compatibles, así como la lentitud en el cómputo de los

resultados puesto que el lenguaje original era interpretado y no compilado, nuestro grupo decidió desarrollar un nuevo software de extracción que incluyera todo el “know-how” desarrollado en anteriores trabajos del mismo. Las especificaciones impuestas al software fueron las siguientes: la aplicación debía ser transportable, de fácil manejo y autoexplicativa para que pudiera ser utilizada por usuarios con distintos niveles de conocimiento, incluidos alumnos de segundo ciclo y de posgrado. Para este último fin, se ha desarrollado una nueva versión “aligerada” de la aplicación aquí presentada, dicha versión docente se denomina *WinModFetLight*, y contiene los algoritmos básicos de extracción de circuitos equivalentes de pequeña señal así como su explicación para poder ser utilizada en docencia, y por ello no se comentará aquí.

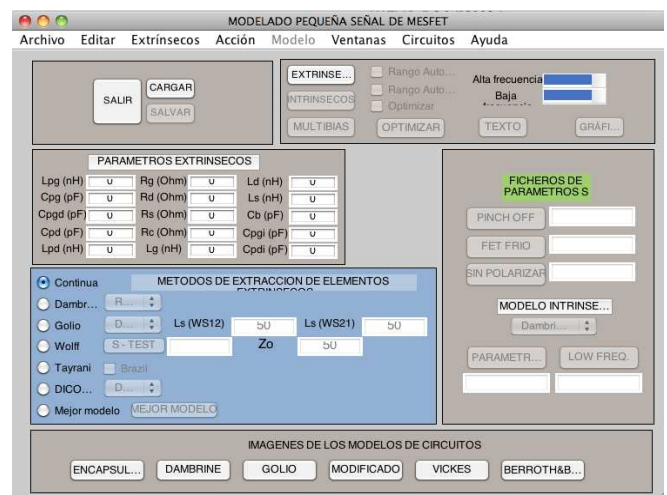


Fig. 1. Menú principal de la aplicación WinModFet

En la versión completa del software *WinModFet*, aquí presentada se ha incluido, un nuevo método de extracción para transistores FET que operen en caliente ( $V_{ds} \neq 0$ ), la novedad del método reside en la realización de una ponderación del área de trabajo deseada y centrada en el punto de de polarización de interés pero para calcular los datos del circuito equivalente se utilizan los ficheros correspondientes a los parámetros de scattering que rodean al punto de interés. Como ejemplo de aplicación se realizará

sobre el posible punto de trabajo de un amplificador operando en clase A como se muestra en la figura 2 para un transistor GEC MARCONI F20 de tecnología Bathtub-200 de 6x120  $\mu\text{m}$  de longitud de puerta con el que ya se había anteriormente trabajado [4]. Todos los cálculos tanto de los elementos intrínsecos como extrínsecos han sido realizados mediante la utilización del nuevo software *WinModFet* aquí presentado.

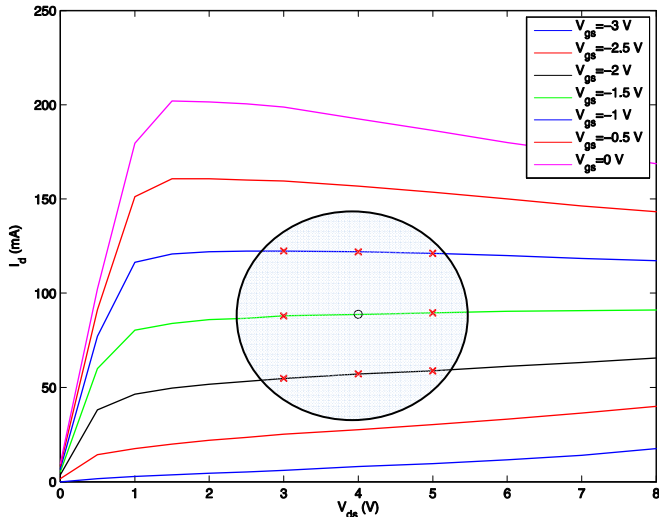


Fig. 2. Curvas características del transistor MESFET GEC MARCONI F20 de tecnología Bathtub-200 de 6x120  $\mu\text{m}$  de longitud de puerta, en la que se muestra los 9 puntos de ponderación seleccionados en las mismas para una correcta extracción de un modelo de pequeña señal para un amplificador en clase A.

## II. EL SOFTWARE WINMODFET

La aplicación *WinModFet*, aquí presentada, consiste en una implementación software de todos los procedimientos previamente presentados detalladamente [4], además de la incorporación de un conjunto de algoritmos de “ponderación” necesarios para que el modelo de pequeña señal sea lo suficientemente exacto en un entorno del punto de trabajo seleccionado. En los resultados presentados en la presente comunicación el objetivo primordial ha sido el diseño de un sencillo amplificador monoetapa en clase A, para otros tipos de diseño el usuario solamente deberá focalizar la atención sobre el punto de trabajo, así como en su entorno.

## III. ELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE PONDERACIÓN

Tal y cómo se ha comentado anteriormente, la modificación adicional a la extracción de un sencillo modelo de pequeña señal consiste en la ponderación de los valores calculados en el punto de interés. En esta comunicación se ha escogido una rejilla de 9 puntos, tal y como puede visualizarse dentro de la región marcada con un círculo sombreado en la Figura 2, aunque elecciones de rejillas superiores o inferiores están disponibles a gusto del usuario en el software. En el caso expuesto en este trabajo, se ha seleccionado el punto de polarización situado en  $V_{ds}=4\text{V}$  y  $V_{gs}=-1.5\text{V}$ . Este punto se encuentra representado en la figura mediante un círculo. Los puntos de ponderación son los adyacentes en las medidas, y están representados mediante una cruz. Una visualización detallada de la Figura 2 permite observar un curioso efecto de segundo orden. Esto se conoce como efecto Gunn, según el cual electrones de la banda de conducción pasan a una segunda banda de conducción donde la movilidad es inferior. Para valores elevados de  $V_{gs}$  y  $V_{ds}$  se

observa un descenso de la corriente de drenador, en vez de una aumento, que sería lo esperado, con lo cual electrones de la banda de conducción pasan a una segunda banda de conducción donde la movilidad es menor.

## IV. EXTRACCIÓN DE ELEMENTOS EXTRÍNSECOS

Los elementos extrínsecos han sido obtenidos mediante la utilización del método de Dambrine [1], aunque métodos como el de Wolff [6] ó los de Golio [3] y [7], son igualmente válidos y en alguna ocasión han utilizado las variaciones de los métodos presentadas en [3-8].

## V. EXTRACCIÓN DE LOS ELEMENTOS INTRÍNSECOS

En este apartado es donde se han realizado una modificación sustancial a los métodos normalmente utilizados, esto es, la ponderación de una zona de las curvas características. Los valores a los que se ha aplicado esta aproximación son los de:  $R_i$ ,  $C_{ds}$  y  $\tau$  ya que, idealmente, deberían ser constantes. Aun así, este no suele ser el resultado obtenido, ya que en la mayoría de los métodos estos valores dependen tanto de la frecuencia como del punto de polarización.

$V_{gs}(\text{V})$	$V_{ds}(\text{V})$	$R_i(\Omega)$	$C_{ds}(\text{pF})$	$\tau(\text{ps})$	Pond.
-2	3	0.335	0.172	4.064	2
-2	4	0.526	0.169	4.206	3
-2	5	0.710	0.166	4.477	2
-1.5	3	0.480	0.178	3.9	3
-1.5	4	0.586	0.173	4.145	5
-1.5	5	0.763	0.171	4.408	3
-1	3	0.510	0.182	3.840	2
-1	4	0.597	0.177	4.144	3
-1	5	0.744	0.172	4.394	2

Tabla I. Valores obtenidos mediante método Dambrine

En la Tabla I se muestran los valores obtenidos junto con los factores de ponderación o “peso” elegidos, en nuestro caso radialmente escogidos según nos alejamos del punto de trabajo. En la Tabla II se muestra el resultado de los valores ponderados o “promediados” según la función “peso” seleccionada en la Tabla I, para un transistor GEC MARCONI F20 de tecnología Bathtub-200 de 6x120  $\mu\text{m}$  de longitud de puerta.

$R_i(\Omega)$	$C_{ds}(\text{pF})$	$\tau(\text{ps})$
0.335	0.172	4.064

Tabla II. Valores finales ponderados según el nuevo procedimiento

Es interesante observar gráficamente la variación de las no linealidades más importantes en el modelado de los transistores FET, con el punto de polarización, del mismo. Estos elementos, típicamente son las capacidades  $C_{gs}$ ,  $C_{gd}$  y la transconductancia de pequeña señal,  $g_m$ , dado que es parámetro del que depende la fuente de corriente no lineal  $I_{ds}$  y que con pequeñas variaciones de la polarización, pueden ver incrementada en gran medida su valor en un pequeño entorno del punto de trabajo elegido (en nuestro caso el  $V_{gs}=-1.5\text{V}$ ,  $V_{ds}=4\text{V}$ ). Los resultados se muestran en la Figura 3, Figura 4 y Figura 5 del presente informe. Es necesario remarcar que no

se ha optimizado matemáticamente los resultados obtenidos en ninguna de las tablas ni de las graficas mostradas en el presente trabajo.

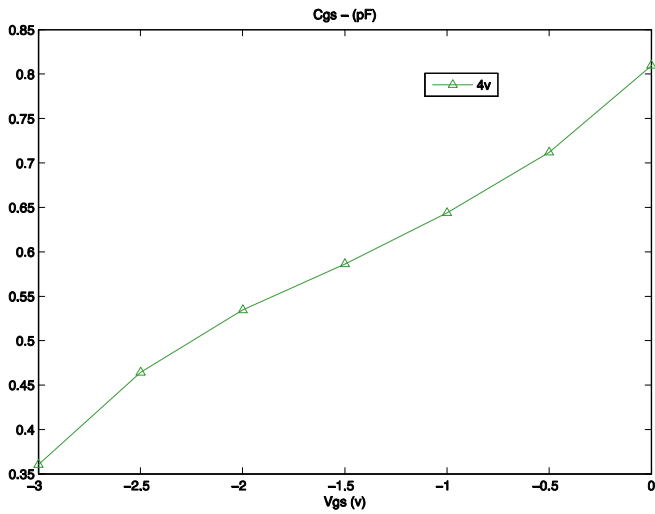


Fig. 3. Cgs frente a Vgs para Vgd=4V

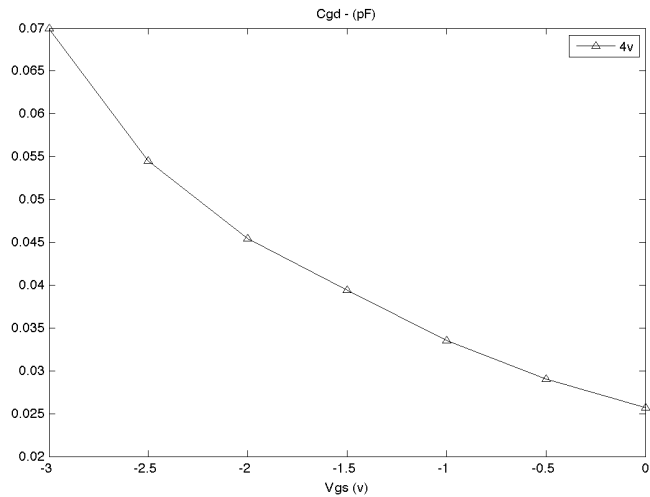


Fig. 4. Cgd frente a Vgs para Vgd=4V

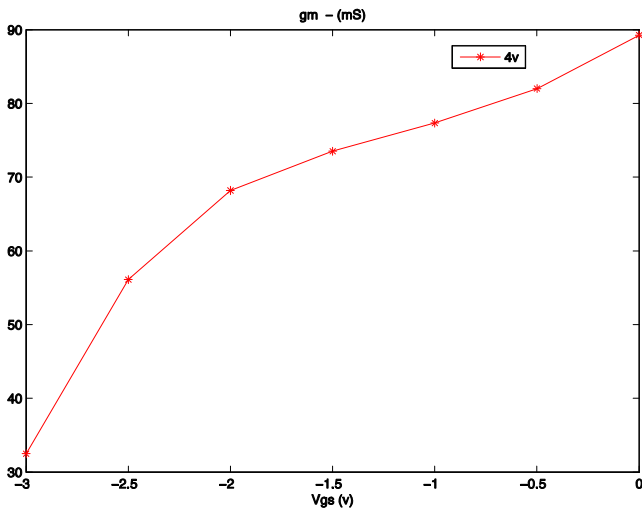


Fig. 5. Grafica de variación de la transconductancia gm frente a Vgs para Vgd=4 V

## VI. COMPARACIÓN ENTRE LAS MATRICES DE PARÁMETROS DE SCATTERING MEDIDOS Y EXTRAIDOS POR WINMODFET

En la figura 6, figura 7, figura 8 y figura 9 se muestra una comparativa entre los parámetros de scattering medidos en

color azul, y modelados a partir del modelo de pequeña señal extraído mediante el software aquí presentado en color verde para el punto de polarización ( $V_{gs}=-1.5$ ,  $V_{ds}=4$ ). Como se puede apreciar existe una buena correlación entre ambos conjuntos de parámetros de dispersión.

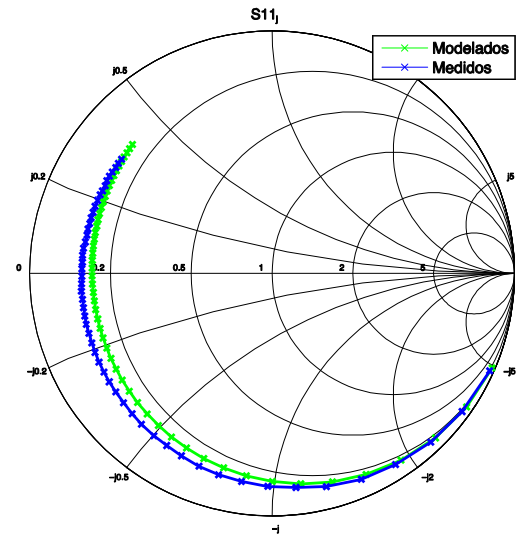


Fig. 6. Valores medidos (azul) vs modelados (verde) para el parámetro S11

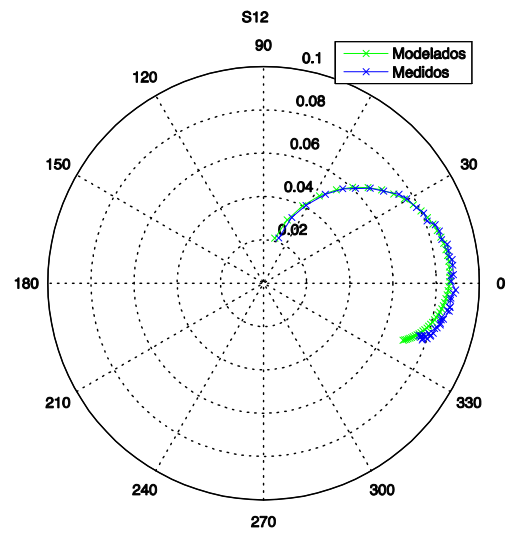


Fig. 7. Valores medidos (azul) vs modelados (verde) para el parámetro S12

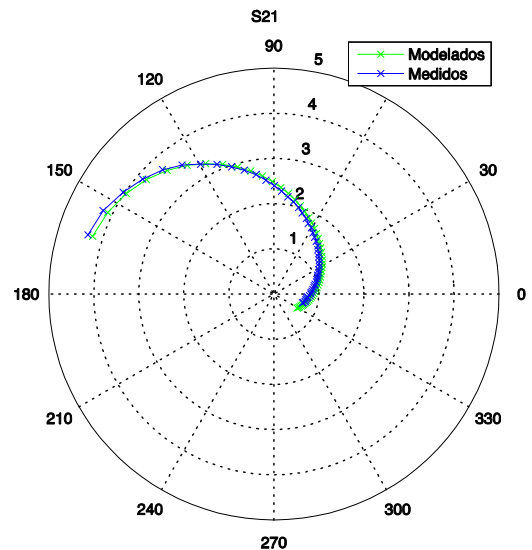


Fig. 8. Valores medidos (azul) vs modelados (verde) para el parámetro S21

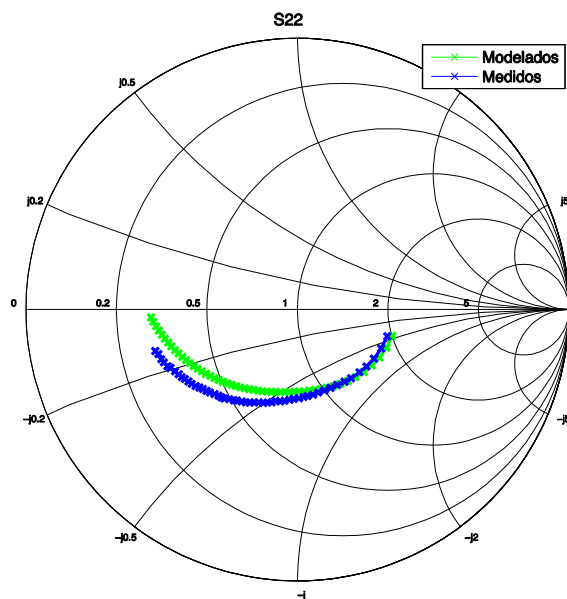


Fig. 9. Valores medidos (azul) vs modelados (verde) para el parámetro S21

En la figura 10 se muestra la función error definida como la media aritmética de las sumas de las funciones error de cada parámetro de scattering en %. En la zona de saturación que es para la que se ha ponderado el modelo el error no supera el 5% en el peor caso, pero según se acerca a la zona del FET frío  $V_{ds}=0$  el error aumenta hasta un 14% debido a que el transistor está en la zona lineal, y la extracción no ha sido ponderada para trabajar en la dicha zona, sino para trabajar en el centro de la zona de saturación (amplificador en clase A).

## VII. CONCLUSIONES

Se ha presentado una aplicación sencilla, intuitiva y transportable ya que ha sido desarrollada en entorno MATLAB. Además se ha implementado en el software una nueva aproximación para la extracción de modelos de pequeña señal orientada al diseño de amplificadores lineales en clase A mediante la ponderación de los 9 ficheros de parámetros de scattering correspondientes a los puntos de polarización adyacentes al punto de trabajo. Esta modificación a los métodos clásicos de extracción se muestra útil para suavizar errores en los datos de medida, ya que no tiene en cuenta un único punto, sino éste y su entorno inmediato.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento por el soporte proporcionado para el presente trabajo al Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto TEC2008-06684-C03-01.

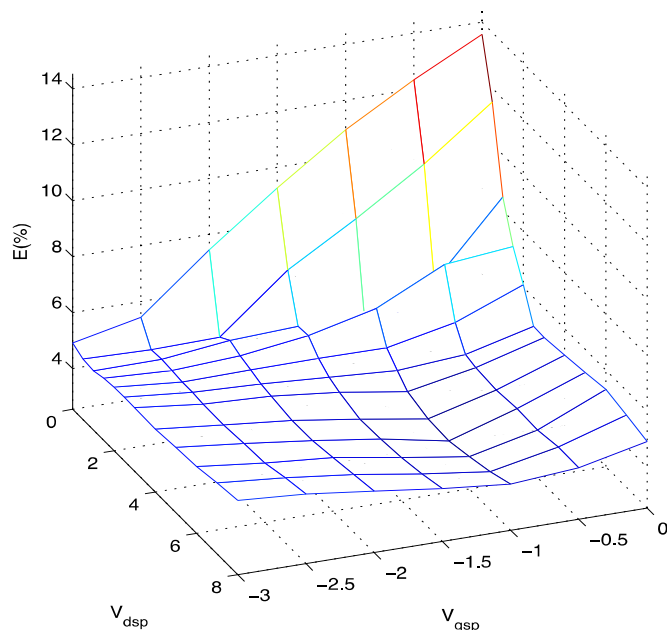


Fig. 10. Error Total de los parámetros de scattering en (%)

## REFERENCIAS

- [1] G. Dambrine, A. Cappy, F. Heliodore and E. Playez "A new method for determining the FET small-signal equivalent circuit", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 35, no. 7, pp. 1151-1159, Jul. 1988
- [2] Berroth M. and Roland Bosch, "High-Frequency equivalent circuit of GaAs Fet's for large-signal applications", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 39, no. 2, pp. 224-229, Feb. 1991.
- [3] Golio. Microwave MESFET's and HEMT's. Artech House 1.991.
- [4] Zamanillo Sainz de la Maza, Jose Maria "Metodología para la extracción lineal y no-lineal de modelos circuitales para dispositivos MESFET y HEMT de media/alta" (Tesis Doctoral - Universidad de Cantabria) <http://www.tdx.cat/handle/10803/10677> [Consulta 2 de mayo de 2011]
- [5] Tayrani R., J. Gerber, T. Daniel, R. Pengelly and U. Rohde. Reliably Extract MESFET and HEMT Parameters. Microwave & RF, pp 131-135, June 1993
- [6] Sledzik and Ingo Wolff, "A new Approach to Nonlinear modelling and simulation of MESFET's and MODFET's", *20th European Microwave Conference*, pp 784-789, 1990
- [7] White Paul M. & Richard M. Healy. "Improved Equivalent Circuit for Determination of MESFET and HEMT Parasitic Capacitances from "Coldfet" Measurements". IEEE Microwave and Guided Letters, Vol. 3, no. 12, December 1993.
- [8] Costa J.C., Monte Miller, Michael Golio and George Norris "Fast, accurate, on-wafer extraction of parasitic resistances and inductances in GaAs MESFET's and HEMT's", *MTT-Symposium*, pp 1011-1014, 1992
- [9] Arnold, Michael Golio, Monte Miller and Bili Beckwith "Direct extraction of GaAs MESFET intrinsic element and parasitics inductance elements", *IEEE MTT Symposium Digest*, pp 359-362, 1990